

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Fitorremediación de suelos contaminados con mercurio
utilizando *Urtica urens* y *Brassica nigra* en función de dos tipos
de enmiendas orgánicas**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Por:

Gabi Jasmin Canaza Chicasaca

Yasel Mamani Condori

Asesor:

MSc. Rose Adeline Callata Chura

Juliaca, octubre de 2022

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

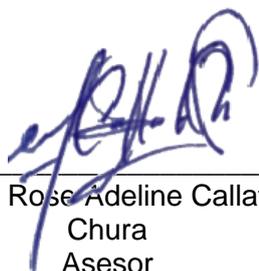
Rose Adeline Callata Chura, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: **“FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON MERCURIO UTILIZANDO URTICA URENS Y BRASSICA NIGRA EN FUNCIÓN DE DOS TIPOS DE ENMIENDAS ORGÁNICAS”** constituye la memoria que presenta los Bachilleres **Gabi Jasmin Canaza Chicasaca** y **Yasel Mamani Condori** para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 24 días del mes de octubre del año 2022.



MSc. Rose Adeline Callata
Chura
Asesor



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 11 día(s) del mes de octubre del año 2022, siendo las 11:00 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, Filial Juliaca, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: Ing. Nancy Lurasí Rafael, el secretario: Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera y los demás miembros: Msc. Jael Galla Galla y el asesor: Msc. Rose Adeline Gallata Chura

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: Fitorremediación de suelos contaminados con mercurio utilizando Urtica urens y Brassica nigra en función de dos tipos de enmiendas orgánicas.

de el(los)/la(las) bachiller/es: a) Yasel Mamani Londeri b) Gabi Tasmín Canaza Chicasaca conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental (Nombre del Título Profesional)

con mención en

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Yasel Mamani Londeri

Table with columns: CALIFICACIÓN, ESCALAS (Vigesimal, Literal, Cualitativa), Mérito. Row 1: Aprobado, 16, B, Bueno, Muy Bueno

Candidato (b): Gabi Tasmín Canaza Chicasaca

Table with columns: CALIFICACIÓN, ESCALAS (Vigesimal, Literal, Cualitativa), Mérito. Row 1: Aprobado, 16, B, Bueno, Muy Bueno

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Signature of Presidente

Signature of Secretario

Signature of Asesor

Signature of Miembro

Signature of Miembro

Signature of Candidato/a (a)

Signature of Candidato/a (b)

ÍNDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS	V
INDICE DE FIGURAS.....	VI
INDICE DE ANEXOS.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUCCIÓN	9
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
2.1 Área de estudio	10
2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	10
2.3 Diseño estadístico	11
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES	11
3.1 Análisis físico químico del suelo	11
3.2 Contenido de mercurio en el suelo antes y después de la fitorremediación	13
3.3 Análisis estadístico	13
3.4 Desarrollo morfológico de la especie <i>Urtica urens</i> y <i>Brassica nigra</i> como bioindicadores de la fitorremediación del suelo contaminado	14
4. CONCLUSIONES	17
BIBLIOGRAFIA	17
ANEXOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los tratamientos

Tabla 2. Resultados del análisis físico-químico del suelo

Tabla 3. Concentraciones de mercurio (Hg) iniciales y finales

Tabla 4. Rangos de concentración final de mercurio en el suelo

Tabla 5. Test Statics de Kruskal-Wallis de concentración final de mercurio

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Promedio del tamaño de la raíz de los tratamientos de *Urtica urens* y *Brassica nigra*.

Figura 2. Procesos implicados en la fitorremediación de los suelos contaminados.

Figura 3. Altura de las plantas de *Urtica urens* y *Brassica nigra*

Figura 4. Cantidad de hojas de las plantas *Urtica urens* y *Brassica nigra*

Fitorremediación de suelos contaminados con mercurio utilizando *Urtica urens* y *Brassica nigra* en función de dos tipos de enmiendas orgánicas

Gabi Jasmin Canaza Chicasaca*¹, Yasel Mamani Condori*², Rose Adeline Callata Chura³

1. Universidad Peruana Unión (UPeU). Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Carretera salida a Arequipa Km 6 Chullunquiani, Juliaca, Puno, Perú. Correo electrónico: gabi.cc@upeu.edu.pe (GJ. Canaza* Autor para correspondencia).
2. Universidad Peruana Unión (UPeU). Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Carretera salida a Arequipa Km 6 Chullunquiani, Juliaca, Puno, Perú. Correo electrónico yasel.mc@upeu.edu.pe (Y. Mamani* Autor para correspondencia).
3. Universidad Peruana Unión (UPeU). Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Carretera salida a Arequipa Km 6 Chullunquiani, Juliaca, Puno, Perú. Correo electrónico rose.callata@upeu.edu.pe (RA. Callata).

RESUMEN

El presente artículo de investigación tiene como objetivo evaluar la capacidad fitorremediadora de la *Urtica urens* y *Brassica nigra* en función de dos tipos de enmiendas orgánicas (estiércol de ovino y humus de lombriz) para reducir el mercurio en suelos contaminados del centro poblado La Rinconada, región Puno. Se instaló dos bloques experimentales y con 3 tratamientos cada uno: Bloque 1 *Urtica urens* (OT1, OO2, OH3), Bloque 2 *Brassica nigra* (BT1, BO2, BH3) por triplicado, con una totalidad de 18 unidades experimentales (parcelas). La siembra de las plántulas se realizó depositando tres semillas en cada parcela. Asimismo, se observó el desarrollo morfológico de las especies cada 15 días durante el tiempo del tratamiento de 4 meses. Los resultados muestran que los niveles de reducción de mercurio, en cuanto a *Urtica urens* y *Brassica nigra* fueron de hasta un 64,34% y 58,56% respectivamente, los mejores resultados que se obtuvieron para remoción de mercurio fue con la especie de *Urtica urens*, en su tratamiento más eficiente OH3 con una concentración final de 42,63 ppm de mercurio. En conclusión, la especie *Urtica urens* posee mayor capacidad fitorremediadora y a eso se suma la enmienda del humus de lombriz pues aporta nutrientes fundamentales para el buen desarrollo de la planta y mejora ligeramente las condiciones fisicoquímicas contribuyendo a una mejor remoción de Hg.

Palabras Clave: Fitorremediación, enmiendas orgánicas, *Urtica urens*, *Brassica nigra*, mercurio.

Phytoremediation of soils contaminated with mercury using *Urtica urens* and *Brassica nigra* according to two types of organic amendments

Gabi Jasmin Canaza Chicasaca^{*1}, Yasel Mamani Condori^{*2}, Rose Adeline Callata Chura³

ABSTRACT

The objective of this research article is to evaluate the phytoremediation capacity of *Urtica urens* and *Brassica nigra* based on two types of organic amendments (sheep manure and earthworm humus) to reduce mercury in contaminated soils of the La Rinconada populated center, La Rinconada region. First. Two experimental blocks with 3 treatments each were installed: Block 1 *Urtica urens* (OT1, OO2, OH3), Block 2 *Brassica nigra* (BT1, BO2, BH3) in triplicate, with a total of 18 experimental units (plots). The sowing of the seedlings was carried out by depositing three seeds in each plot. Likewise, the morphological development of the species was observed every 15 days during the 4-month treatment time. The results show that the levels of mercury reduction, in terms of *Urtica urens* and *Brassica nigra* were up to 64,34% and 58,56% respectively, the best results that were obtained for mercury removal was with the species of *Urtica urens*, in its more efficient treatment OH3 with a final concentration of 42,63 ppm of mercury. In conclusion, the species *Urtica urens* has greater phytoremediation capacity and to this is added the earthworm humus amendment as it provides essential nutrients for the good development of the plant and slightly improves the physicochemical conditions contributing to a better removal of Hg.

Keywords: Phytoremediation, organic amendments, *Urtica urens*, *Brassica nigra*, mercury.

1. INTRODUCCIÓN

El mercurio es una sustancia sumamente tóxica (Arana, 2009); el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA (2005) indica también que esta sustancia tiene efectos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente. Asimismo, cuando el Hg es expulsado en el medio ambiente en estado gaseoso, este es transportado con las corrientes de aire hasta llegar nuevamente al suelo, en esta fase es donde los microorganismos tienen la capacidad de transformarlo en metilmercurio, este compuesto de mercurio es más tóxico a bajas concentraciones que el mercurio en su estado elemental (Weinberg, 2007). Por lo tanto, una vez que el mercurio este depositado en el suelo, está sujeta a reacciones bioquímicas, es decir a condiciones de temperatura, pH, contenidos de sales y compuestos orgánicos del mismo suelo que favorecen la formación de complejos del ion inorgánico (Hg^{2+}) como cloruro de mercurio (HgCl_2), hidróxido de mercurio ($\text{Hg}(\text{OH})_2$) o llamados también complejos orgánicos (Cabañero, 2005).

Las moléculas que constituyen la materia orgánica contienen grupos funcionales como el carboxilo, fenol, grupos aminos y sulfhídrico que pueden formar complejos muy estables con los iones metálicos, reduciendo su movilidad del mercurio en el suelo, haciendo que estos actúen como grandes reservas de mercurio (Caiza, 2018). En ambientes y suelos sulfurosos las bacterias reductoras del sulfato estimulan la reacción de formación de HgS, insoluble, a partir de H_2S y Hg^{2+} , lo que surge una variación en la disponibilidad del Hg en el suelo. Como paso previo a la formación de HgS, se forma el sulfuro de dimetilmercurio ($\text{CH}_3\text{Hg})_2\text{S}$; el HgS es una forma poco móvil y poco reactiva del Hg (Castillo, 2005).

El Perú experimenta un acelerado proceso de inversiones en actividades mineras, y cabe resaltar que hoy en día la minería informal está desarrollándose en 21 regiones del Perú y se está produciendo ambientes contaminados con mercurio (Hurtado, 2014); nuestra región no es ajena a este procesos y se puede considerar como muestra al centro poblado La Rinconada del distrito de Ananea, ubicada a más de 4650 msnm, donde el mayor problema de contaminación ambiental generado por la minería artesanal de extracción de oro es el elevado contenido mercurio en los suelos, alterando los ecosistemas, provocando la pérdida de la flora y fauna, causando también infertilidad del suelo y reducción de áreas de cultivos y ganadería; también provoca enfermedades neurodegenerativas como la esclerosis lateral amiotrófica, el Alzheimer y el Parkinson, asimismo, afectan al sistema inmune y a los riñones (Medina, 2007 y Caiza, 2018).

Precisa entonces implementar sistemas de tratamiento de suelos contaminados con mercurio, siendo la fitorremediación una de ellas. De acuerdo a Chaney et ál. (1997) y Grandez (2017) la fitorremediación de suelos es una de las alternativas más eficaces y ambientalmente amigable para resolver la contaminación por metales pesados en el suelo, que consiste en el uso de plantas y sus microorganismos asociados para remover, transferir, estabilizar y/o degradar contaminantes del suelo. También Hirzel y Sperberg (2016) indican que la fitorremediación es más eficiente si se emplean enmiendas orgánicas, de manera que al adicionarlas optimizan las propiedades del suelo y contribuyen el desarrollo de las plantas. Es importante mencionar que el humus de la lombriz aumenta la fertilidad del suelo (física, química y biológica), es rico en flora microbiana, contiene nutrientes como nitrógeno (1-2%), potasio (1-2%), fósforo (2-8%), sodio (0,02%), magnesio (1-2,3%) y calcio (2-8%). Del mismo modo, el estiércol de ovino aporta de forma considerable nutrientes al suelo como nitrógeno (0,55-1,95%), fósforo (0,01-0,31%) y potasio (0,15-1,28%), mejora la porosidad y aumenta la retención de agua. Asimismo, el humus de lombriz constituye entre un 10 a 40% del medio de crecimiento de las plantas (Fercon, 2006). Por lo tanto, estas influyen positivamente en el crecimiento y desarrollo de las plantas, mejorando subsecuentemente los procesos de fitoestabilización y/o fitoextracción de metales pesados (Miranda et ál., 2014).

Cabe mencionar también que los microorganismos del suelo producen sideróforos y quelatos de hierro que aseguran la disponibilidad del hierro en la rizosfera, reducen el pH del suelo y/o solubilizan metal-fosfatos, lo que afecta la movilidad y disponibilidad de metales para las plantas (Freitas, 2009).

El presente artículo tiene el objetivo de evaluar la capacidad fitorremediadora de las especies *Urtica urens* y *Brassica nigra* en función de dos tipos de enmiendas orgánicas (estiércol de ovino y humus de lombriz) para reducir el mercurio en suelos contaminados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El lugar de muestreo es en el centro poblado La Rinconada sector Antahuila, y está ubicado en la región de Puno provincia de San Antonio de Putina, del distrito de Ananea (14°40'40"S – 69°31'56'O); abarca un área total de 939,56 km² aproximadamente y se encuentra a una altura de 4660 m.s.n.m.

2.2 Diseño experimental

La muestra fue de 228 kg de suelo contaminado por mercurio del centro poblado La Rinconada del Sector Antahuila, asimismo, los usos de las enmiendas orgánicas fueron de 48 kg de estiércol de ovino y 48 kg de humus de lombriz, la unidad de análisis fue de 27 semillas de *Urtica urens* y 27 semillas de *Brassica nigra*. Los semilleros que se utilizaron para la introducción de las especies a suelos contaminados por mercurio correspondieron a parcelas de 60 cm de largo x 30 cm de ancho y 20 cm de profundidad. El experimento se realizó en un área adecuada de un domicilio del distrito de San Miguel, en la Urbanización Collasuyo Mz D5 Lt2.

El experimento consistió en 2 bloques con 3 tratamientos: Bloque 1 *Urtica urens* (OT1, OO2, OH3), Bloque 2 *Brassica nigra* (BT1, BO2, BH3) con 3 repeticiones cada uno, siendo un total de 18 unidades experimentales (parcelas).

Tabla 1.

Descripción de los tratamientos

Especies fitorremediadora	Tratamientos	Suelo contaminado %	Enmiendas		N° de semillas de <i>Urtica urens</i> y <i>Brassica nigra</i>
			Ovino %	Humus %	
<i>Urtica urens</i>	OT1	100	0	0	3
	OO2	60	40	0	3
	OH3	60	0	40	3
<i>Brassica nigra</i>	BT1	100	0	0	3
	BO2	60	40	0	3
	BH3	60	0	40	3

Los parámetros que se evaluaron son: tamaño de la raíz, altura del tallo y el número de hojas de las especies *Urtica urens* y *Brassica nigra*, y estos cada 15 días durante el tiempo del tratamiento.

Posteriormente al finalizar el tratamiento (4 meses) se extrajeron las plantas para su eliminación y se llevaron las muestras de suelo a laboratorio para evaluar los niveles de mercurio, y los parámetros físico-químicos del suelo (pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio y textura del suelo); el análisis del mercurio se realizó en el laboratorio acreditado RHLab S.A.C. ubicado en la ciudad de Juliaca.

2.3 Diseño estadístico

El análisis estadístico se realizó utilizando el programa estadístico SPSS versión 25, y se utilizó la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis que nos permite conocer si los tratamientos son iguales o algunas de ellas presenta promedio mayor que la otra. Los análisis fueron realizados a un nivel de confianza del 95%, siendo el nivel de significancia el 5%.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Análisis físico químico del suelo

La tabla 2 muestra los resultados de los análisis físico-químicos (pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio y textura) del suelo contaminado por mercurio antes y después del proceso de fitorremediación con las especies *Urtica urens* y *Brassica nigra*.

Tabla 2.

Resultados del análisis físico-químico del suelo

Parámetros	Análisis inicial del suelo contaminado por mercurio	<i>Urtica urens</i>			<i>Brassica nigra</i>		
		OT1	OO2	OH3	BT1	BO2	BH3
Potencial de hidrogeno	5,1	5,87	7,35	6,56	4,79	7,25	6,78
Conductividad eléctrica (mmhos/cm)	2,36	2,85	3,20	3,22	2,40	2,70	3,10
Materia orgánica (%)	2,01	2,16	2,87	2,97	2,00	2,90	2,33
Nitrógeno (%)	0,88	0,08	0,11	0,11	0,07	0,11	0,09
Fosforo (ppm)	11,99	11,11	12,30	12,60	11,90	13,60	10,40
Potasio (ppm)	996,9	3970,00	4300,00	9500,00	8400,00	9400,00	8770,00
Textura	Franco limoso	F	F	FL	F	FL	FL

Nota: OT= Ortiga testigo, OO=Ortiga ovino, OH=Ortiga humus; BT=Brassica testigo, BO=Brassica ovino, BH= Brassica humus

Potencial de hidrogeno (pH)

En la tabla 2 el pH pasó de 5,1 (fuertemente ácido) a un pH final promedio de 6,43 siendo un suelo ligeramente ácido y de acuerdo con Adriano (1986) este suelo presenta moderada movilidad del mercurio, también indica que el pH es uno de los factores más importantes que afecta la estabilidad del mercurio en el suelo y señala que el Hg está disponible en un pH ácido (por debajo de 5,5). Por otra parte, Chaney et ál. (1997) mencionan que a mayor acidez la absorción y remoción de metales pesados por medio de la fitorremediación es más elevada. Por lo tanto, la transferencia del mercurio a la planta depende de las propiedades del suelo, como el pH el cual influye en la disponibilidad del metal en la solución del suelo (Cogua, 2012).

Conductividad eléctrica (CE)

Aguilar y González (1998) señalan que la CE está relacionada con la suma de cationes o aniones, y que las presencias de sales solubles en el suelo determinan la presencia en solución de cationes de calcio, magnesio y sodio, eso se corrobora en la tabla 2, donde la CE inicial fue de 2,36 mmhos/cm lo que determina que está en el rango muy ligeramente salino, posterior al tratamiento de fitorremediación se obtuvo un promedio final de 2,91 mmhos/cm clasificándose también como muy ligeramente salino, estas condiciones de los niveles de conductividad eléctrica que tenían las enmiendas orgánicas favorecieron la fitorremediación, puesto que en el suelo existe suficiente cantidad de iones solubles más favorables para las plantas.

Materia orgánica (MO)

La materia orgánica inicial presenta un porcentaje de 2,01% lo que significa que está en el rango medio de materia orgánica. Asimismo, la materia orgánica final oscila entre 2 a 2,97%, encontrándose en un rango medio. Este incremento es debido a que el estiércol de ovino y humus de lombriz contienen 40% de materia orgánica equivalentes a 8 kg, lo cual en el proceso de fitorremediación hizo que el valor de materia orgánica aumentara. De este modo, la concentración de mercurio en solución presente en un suelo está controlada por las reacciones de adsorción-desorción con la materia orgánica y los minerales de éste, reduciendo las pérdidas de mercurio del suelo por volatilización (López et ál., 2010). Por otro lado, Cogua (2012) señala que la transferencia del mercurio a la planta dependerá de la materia orgánica presente en el suelo, puesto que favorece a la formación de complejos entre el mercurio y la materia orgánica, reduciendo la movilidad del metal.

Nitrógeno (N)

La tabla 2 muestra el análisis para el porcentaje de nitrógeno inicial con 0,88% clasificándose en un rango alto de nitrógeno total en el suelo, sin embargo, el nitrógeno final obtuvo un descenso significativo entre los tratamientos. Según Jenkinson (1981) este descenso de nitrógeno podría ser debido a que en las adiciones de enmiendas orgánicas se puede presentar la inmovilización del nitrógeno, dependiendo de la relación C/N, ya que esta tiende a estimular la inmovilización más que la mineralización. Por lo tanto, puede ocasionar pérdida de nitrógeno a través de procesos de desnitrificación y lixiviación. Asimismo, Sierra y Rojas (2005) señalan que generalmente más del 95% de nitrógeno total del suelo se encuentra en estado orgánico formando parte de la materia orgánica. Por otra parte, las plantas captan nitrógeno principalmente como amonio y nitrato. Estas dos formas de nitrógeno difieren en su metabolismo en la planta, en la cual se convierten en aminoácidos; el amonio se metaboliza en las raíces y requiere más oxígeno, mientras que el metabolismo del nitrato tiene lugar en las hojas (Sela, 2008).

Fósforo (P)

La tabla 2 presenta los resultados de análisis de fósforo, el tratamiento BO2 tuvo mayor fósforo en el suelo con 13,60 ppm. Lo cual muestra que difieren entre los seis tratamientos. Sánchez (2003) menciona que el humus de lombriz contiene fósforo de 2 a 8%. Sin embargo, el estiércol de ovino contiene fósforo de 0,01 a 0,31% (Fercon, 2006).

Potasio (K)

La tabla 2 muestra los valores finales de potasio, los tratamientos presentan una diferencia significativa alta. De acuerdo con Alvares (2019) en los procesos metabólicos de la planta, el potasio

juega un rol clave: es esencial en la fotosíntesis, promueve la síntesis, translocación y el almacenamiento de carbohidratos y optimiza la regulación hídrica en los tejidos vegetales. Por tanto, se puede concluir que los dos tipos de enmiendas orgánicas utilizadas en cada tratamiento si influyeron en el potasio disponible en el suelo.

Textura del suelo

La tabla 2 muestra que la textura del suelo no tuvo una mejora considerable, es decir que la aplicación de las enmiendas orgánicas durante el tratamiento no mostró efectos en la textura del suelo siendo franco limoso antes y posteriormente del tratamiento. Asimismo, Sierra (2006) menciona que la textura determina la disponibilidad de metales pesados en el suelo, la cual condiciona la infiltración en el suelo. De tal forma, la zona de estudio presenta un suelo franco limoso, por sus características el Hg puede impregnarse hasta contaminar el nivel freático.

3.2 Contenido de mercurio en el suelo antes y después de la fitorremediación

La tabla 3 muestra los resultados del nivel de concentración de mercurio antes y después del proceso de fitorremediación de cada tratamiento y el porcentaje removido del suelo contaminado con las especies *Urtica urens* y *Brassica nigra*.

Tabla 3.
Concentraciones de mercurio (Hg) iniciales y finales

Especies	Tratamientos	Concentración de Hg inicial en el suelo (ppm)	Concentración de Hg final en el suelo (ppm)	Porcentaje de remoción (%)
<i>Urtica urens</i>	OT1	119,52	98,4	17,67
	OO2	119,52	61,71	48,37
	OH3	119,52	42,63	64,34
<i>Brassica nigra</i>	BT1	119,52	109,97	7,99
	BO2	119,52	91,11	23,77
	BH3	119,52	49,65	58,46

La tabla 3 muestra que existe una capacidad de remoción estimable según los criterios reportados por León (2018) y Vidal (2009). En cuanto a la enmienda orgánica (humus de lombriz) aplicada posee un alto contenido de microorganismos por lo que conllevan a una mayor remoción como en el caso del tratamiento OH3, es por ello que es superior a cualquier otro tipo de enmienda orgánica, produce también un rendimiento significativo y favorece al incremento del pH en el suelo. *Urtica urens* con humus de lombriz son la mejor combinación para la fitorremediación coincide lo reportado por otros autores como Mosquera (2010) y Tognetti et ál. (2005). También es importante mencionar que ambas especies aplicadas en los tratamientos extrajeron Hg durante el periodo estudiado, sin afectar la fisiología de la planta según las discreciones de Buelvas (2017).

3.3 Análisis estadístico

Los resultados presentan los niveles de concentración final de mercurio, los datos fueron determinados usando el programa estadístico SPSS versión 25.

Tabla 4.
Rangos de concentración final de mercurio en el suelo

		Rangos	
Tratamiento		N	Rango promedio
Remoción_Hg	OT1	3	14,00
	OO2	3	8,00
	OH3	3	2,00
	BT1	3	17,00
	BO2	3	11,00
	BH3	3	5,00
	Total	18	

La tabla 4 muestra los resultados favorables para el tratamiento OH3, demostrando la eficiencia existente de la especie *Urtica urens* con humus de lombriz. Se corrobora, que el humus de lombriz constituye una fuente de materia orgánica de alto contenido de nutrientes y portador de sustancia bioestimuladoras, que favorecen el crecimiento de la planta y proporciona mejores rendimientos (Rodríguez, 2019). Asimismo, la enmienda mejora las características biológicas y físicas del suelo (Arevalo de Gauggel, 2009).

Tabla 5.
Test Statics de Kruskal-Wallis de concentración final de mercurio

Estadísticos de contraste^{a,b}	
	Remoción_Hg
Chi-cuadrado	16,579
gl	5
Sig. asintót.	,005
a. Prueba de Kruskal-Wallis	
b. Variable de agrupación: Tratamiento	

La tabla 5 muestra que los tratamientos tienen una prueba de significancia de 0,005 siendo menor al valor $p < 0,05$, entonces rechazamos la hipótesis nula y se concluye que con un nivel de significación del 5%, la remoción de mercurio difiere entre los seis tratamientos.

3.4 Desarrollo morfológico de la especie *Urtica urens* y *Brassica nigra* como bioindicadores de la fitorremediación del suelo contaminado

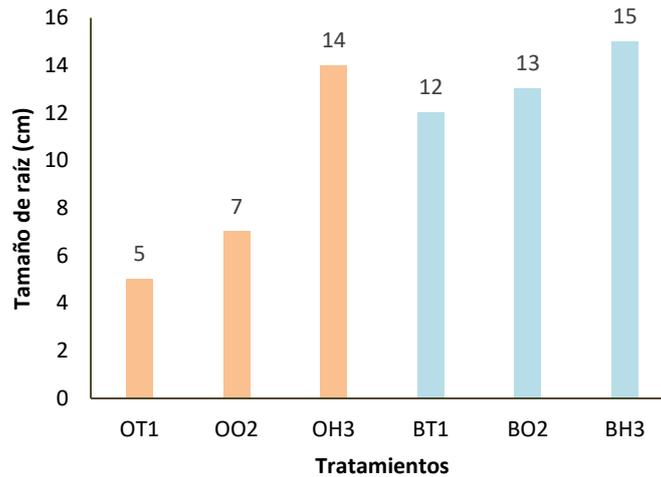


Figura 1. Promedio del tamaño de la raíz de los tratamientos de *Urtica urens* y *Brassica nigra*

En la figura 1 la especie *Brassica nigra* en su tratamiento BH3 obtuvo un mayor crecimiento en las raíces, debido a condiciones climáticas y su adaptación rápida. La fitorremediación aprovecha la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos como: metales pesados, es por ello que el número de raíces implica mayor absorción de nutrientes por ser los órganos de la planta que contribuye a la remoción (Kelley et ál., 2000) . En la experimentación se agregó enmiendas orgánicas (humus de lombriz y estiércol de ovino) lo que ayudó a la especie *Brassica nigra* absorber mayor porcentaje de mercurio en las raíces y considerable producción de biomasa. El mercurio es capturado por las raíces y luego trasladadas hacia las partes aéreas como el tallo y las hojas esta tendencia se ve reflejada en nuestra investigación y en contraste con Ortiz (2009).

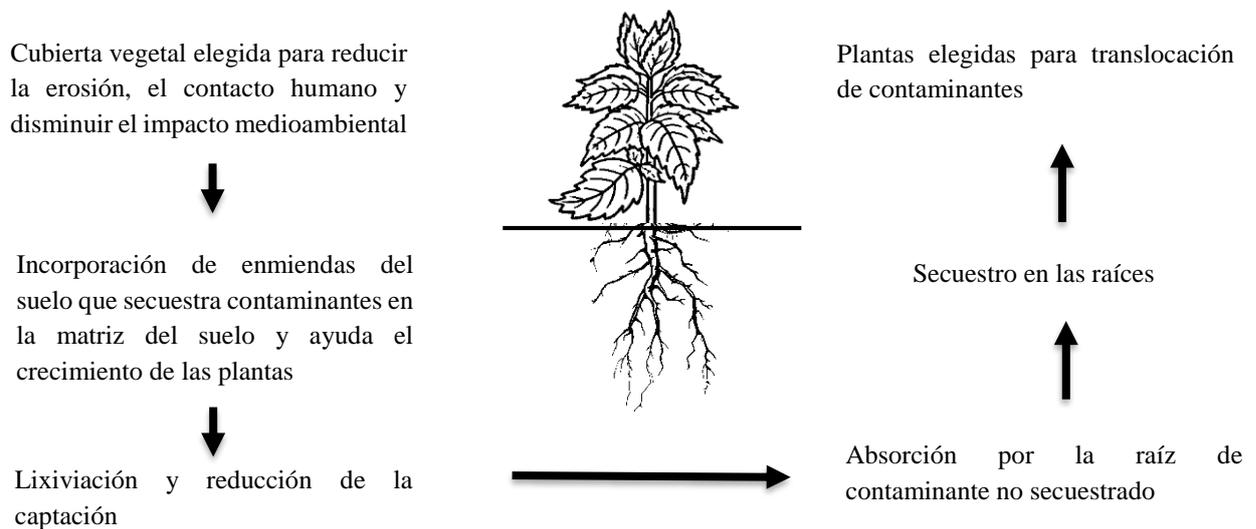


Figura 2. Procesos implicados en la fitorremediación de los suelos contaminados modificado por Bayón (2015).

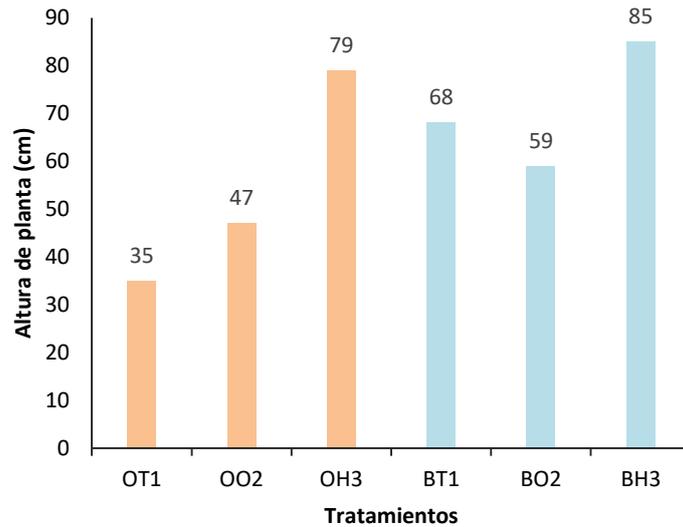


Figura 3. Altura de las plantas de *Urtica urens* y *Brassica nigra*

En la figura 3 podemos observar que los tamaños de las plantas varían en cada tratamiento, estas oscilan de 14 a 85 cm, el tratamiento BH3 alcanzó mayor tamaño en un promedio de altura con 85 cm desarrollando mayor cantidad de biomasa; por otro lado, el crecimiento de ambas especies *Urtica urens* y *Brassica nigra* se vieron beneficiadas por las enmiendas orgánicas aplicadas (Bonilla, 2015). Asimismo, el humus de lombriz presentó un mejor crecimiento en altura de planta, además acumuló mayor concentración de Hg (Arévalo, 2014). El humus de lombriz, provoca diversos efectos positivos como el aporte de nutrientes esenciales para el buen desarrollo de la planta (Laich, 2011). Las enmiendas aplicadas en los tratamientos sí influyen en el crecimiento de la planta.

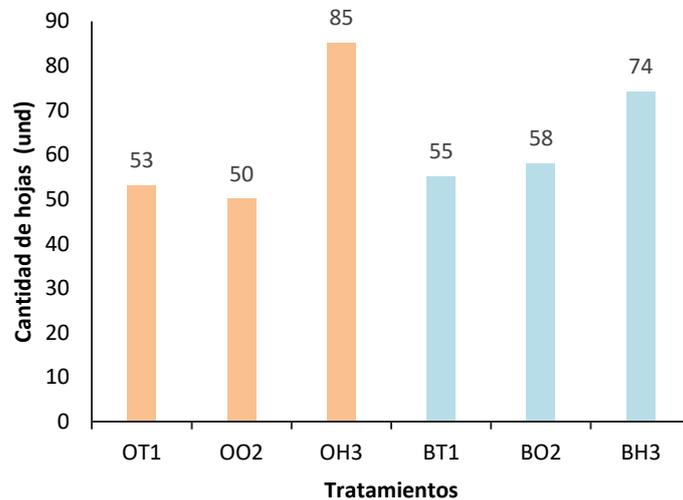


Figura 4. Cantidad de hojas de las plantas *Urtica urens* y *Brassica nigra*

La figura 4 muestra que el número de hojas varían en cada tratamiento, estas oscilan entre 50 a 85 unidades, no hubo ninguna afectación fitotóxica sobre las hojas, ya que al sembrar las plantas se consideró el nivel de pH del suelo inicial de 5,1, es por ello que estas tendrían un suelo estable para poder desarrollarse satisfactoriamente, después de los 4 meses de tratamiento se verificó que el pH final del suelo en todos los tratamientos oscilan entre 4,79 a 7,3, este resultado nos indica que el pH del suelo sigue siendo favorable para el desarrollo de la planta (Aquino et ál., 2019). Así mismo se

tomó en cuenta la conductividad eléctrica inicial de 2,36 mmhos/cm, esto nos indica que es un suelo que se encuentra a un nivel de salinidad dentro de los parámetros de calidad de suelo, también se aprecia que la conductividad final del suelo no varió mucho, pues se encuentra dentro del rango muy ligeramente salino para todos los tratamientos, lo que indica que en la presente investigación ambas especies se desarrollaron propiciamente (Barceló y Poschenrieder, 1992).

4. CONCLUSIONES

La especie con el mejor resultado para remoción de mercurio fue *Urtica urens* en el tratamiento OH3 (suelo contaminado más humus de lombriz) con una concentración final de 42,63 ppm de mercurio y un porcentaje de remoción del 64,34% en cuatro meses de tratamiento.

Las variaciones de las características morfológicas son significativas después del proceso de fitorremediación, el crecimiento de las especies *Urtica urens* y *Brassica nigra* en los tratamientos BH3 y OH3 presentaron mayor desarrollo alcanzando una altura de 85 y 79 cm respectivamente. Asimismo, la longitud de las raíces y la cantidad de hojas fue mayor en los mismos tratamientos. Del mismo modo, los niveles de pH se lograron mejorar ligeramente las condiciones iniciales, los valores de conductividad eléctrica se incrementaron favoreciendo la disponibilidad de cationes metálicos en los tratamientos OH3 y BH3 formando complejos y en lo que implica materia orgánica se observaron cambios ascendentes debido a las enmiendas orgánicas utilizadas (estiércol de ovino y humus de lombriz).

BIBLIOGRAFIA

- Adriano, D. (1986). Trace elements in the terrestrial environment. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 62(12), 1316–1320. <https://doi.org/10.1177/003591576906201244>
- Aguilar, F., & González, P. (1998). *Utilización Agrícola de Compost de Residuos sólidos urbanos en cultivos leñosos de la provincia de Cordova*. (p. 166). 1998.
- Arana, M. (2009). El caso del derrame de mercurio en Choropampa y los daños a la salud en la población rural expuesta. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 26(1), 113–118.
- Arevalo de Guggel, G. (2009). *Fitorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos de petróleo, ciencias sociales*. (p. 57).
- Arévalo, J. (2014). Fitorremediación De Suelos Contaminados Por Hidrocarburos De Petróleo. *Facultad de Ciencias Sociales de La Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima Perú*, 1(30), 113–121.
- Barceló, J., & Poschenrieder, C. (1992). Respuestas De Las Plantas a Los Contaminantes: " La Fitorremediación ". *Suelo y Planta*, 2(January 1992), 345–361.
- Bonilla, S. (2015). Estudio para tratamientos de biorremediación de suelos contaminados con plomo, utilizando el método de fitorremediación. *Universidad Politecnica Salesiana de Quito, Campus Sur.*, 1(256–565), 1–100.
- Buelvas, A. (2017). Capacidad de la Acacia mangium como planta fitorremediadora de suelos contaminados con mercurio. *Universidad de Córdoba Facultad de Ingeniería Ambiental Montería, Córdoba*, 4(1), 724–732. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/en/mdl-20203177951%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/s41562-020-0887-9%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/s41562-020-0884-z>.
- Cabañero, A. (2005). Acumulación-Interacción De Especies De Mercurio Y Selenio En Tejidos Animales: Desarrollo De Nuevas Metodologías De Análisis. In *Universidad Complutense de Madrid*. 2005.
- Caiza, G. (2018). Mercurio en el Suelo. Contaminación y Remediación. *Universidad Complutense*,

Facultad de Farmacia, 1–20.

- Castillo, F. (2005). Biotecnología Ambiental. In *Syria Studies* (Vol. 7, Issue 1).
- Chaney, R. (1997). Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology (COBIOT)*, 8, 279–284. [https://doi.org/10.1016/s0958-1669\(97\)80004-3](https://doi.org/10.1016/s0958-1669(97)80004-3)
- Cogua, P. (2012). Concentración de mercurio total y metilmercurio en sedimento y seston de la Bahía de Cartagena. *Universidad Nacional de Colombia.*, 41(1107), 267–285.
- Durango, V. (2009). Capacidad del Guarumo (*Cecropia peltata*) como planta fitorremediadora de suelos contaminados con mercurio. *Universidades Estatales Del Caribe Colombiano.*, 2(5), 255.
- Freitas, H. (2009). Isolation and characterization of Ni mobilizing PGPB from serpentine soils and their potential in promoting plant growth and Ni accumulation by Brassica spp. *Chemosphere*, 75(6), 719–725. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.01.056>
- Grandez, M. (2017). “Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del río mantaro, Junin, mediante fitorremediación con girasol (*Helianthus Annus*) y Maiz (*Zea Mays*) usando enmiendas. *Universidad César Vallejo*, 101.
- Hirzel, J., & Sperberg, F. (2016). Guía de manejo y buenas prácticas de aplicación de enmiendas orgánicas en agricultura. *INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias*, 325, 58.
- Hurtado, J. (2014). La Biotecnología al servicio de la minería: Caso del mercurio. *Universidad Peruana Cayetano Heredia*, 1–6.
- Kelley, C., Gaither, K. K., Baca-Spry, A., & Cruickshank, B. J. (2000). Incorporation of Phytoremediation Strategies into the Introductory Chemistry Laboratory. *The Chemical Educator*, 5(3), 140–143. <https://doi.org/10.1007/s00897000383a>
- León, I. (2016). Evaluación de la medicago sativa (Alfalfa), *Cecropia peltata* (Guarumo) y *Arachis pintoi* (Mani forragero) como potenciales especies fitorremediadoras para remediación de suelos contaminados por minería Aurífera en las Riveras del río Nambija. Zamora, Ecuad. In *Universidad Nacional de Loja*. Universidad Nacional de Loja.
- López, I., Sierra, J., Rodríguez, J., & Millán, R. (2010). Estudio de la absorción y Distribución del Mercurio en *Nerium Oleander* en la Ribera del Río Valdeazogues (Estación de Chillón-Almadén). *Informes Técnico Ciemat*.
- Medina, G. (2007). Estudio de Investigación de la Minería Ilegal en el Perú: Repercusión para el Sector Minero y el país. In *Instituto de Ingenieros de Minas del Perú*.
- Miranda, R., Lascano, M., Caballero, A., & Bosque, H. (2014). Influencia de la dosis de estiércol ovino y bioinsUMO en la mineralización del nitrógeno. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 1(1), 92-98. [Consulta: 13 diciembre 2021].
- Mogollón, C., Parrilla, Y., Sotero, P., & Valderrama, D. (2018). Remoción de metales pesados con *Urtica Urens* l. en suelos contaminados del distrito de Huamachuco, provincia Sánchez Carrión, La Libertad. In *Universidad César Vallejo* (Vol. 53, Issue 9).
- Mosquera, B. (2010). *Abonos orgánicos protegen el suelo y garantizan alimentación sana*.
- Ortiz, H. (2009). Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando quelite (*Amaranthus hybridus*) y micorrizas. *Universidad Autónoma Chapingo*, 15(2), 161–168.
- PNUMA. (2005). *Evaluación mundial sobre el mercurio*.
- Rodríguez, F. (2019). Efecto de la rotación de cultivos y el reciclaje de residuos orgánicos sobre algunos indicadores del crecimiento y productividad del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba*.
- Sierra, C., & Rojas, C. (2005). La materia orgánica y su efecto en las características físico-químicas y biológicas del suelo. In *INIA-La Platina*. INIA-La Platina.
- Tognetti, C., Laos, F., Mazzarino, M. J., & Hernández, M. T. (2005). Composting vs. Vermicomposting: A Comparison of end product Quality. *Compost Science & Utilization*, 13(1), 6–13.
- Weinberg, J. (2007). Introducción a la Contaminación por mercurio para las ONG. *Annual Review of Plant Biology*, 42(1), 35.